

A mechanikai és a hidraulikai talajstabilitás közötti összefüggés vizsgálata a terhelési idő függvényében

FAZEKAS ORSOLYA és RAINER HORN

Christian-Albrechts Egyetem, Kiel (Németország)

A talaj nemcsak a növények élőhelyéül szolgál, hanem egyidejűleg a mezőgazdasági gépek munkaszínhelye is. A mezőgazdaság gyors fejlődésével növekszik a talajdegradáció, különösen a talajtömörödés veszélye is. Az 1950-es évekig a talajtömörödés csekély jelentőséggel bírt (SÖHNE, 1951). A nagyobb növényi produkció elérése érdekében egyre nagyobb teljesítményű mezőgazdasági gépeket kezdtek alkalmazni, amely egyúttal a gépek súlyának növekedésével járt együtt. Ez azonban a talaj mélyebb rétegeiben is megjelenő és hosszantartó szerkezetleromlásához vezethet (SOANE et al., 1981a,b; VOORHEES, 1978; HAKANSSON et al., 1987; HORN et al., 2000; BIRKÁS, 2001; FARKAS et al., 2004), aminek hatása van a pórusrendszerre és a talaj vízvezető képességére (FARKAS, 2004). A folyamat következtében csökken a levegővel telített pórusok száma és mérete, ami maga után vonja a vízvezető képesség csökkenését és az aerációs viszonyok romlását. Emiatt a növények számára szükséges tápanyagok nehezen szállítódnak a gyökerekhez, ezért lelassul a növények fejlődése. A talajtömörödés gátolja a víz talajba történő beszívargását, amely a felszíni elfolyás és vízerózió növekedéséhez vezet (HORN et al., 1994).

A talaj stabilitásának meghatározásához korábban a talaj fizikai állapotváltozását vették figyelembe a terhelés előtt és után (HARTGE & HORN, 1999), mivel a terhelés miatt bekövetkezett fizikai folyamatoknak az ökológiai értékelésnél nagy jelentősége van. Tekintettel arra, hogy a mechanikai terhelhetőség konszolidációs kísérlet alapján történő megítélése nemcsak teher-, hanem időfüggő is (KÉZDI, 1952), egyre inkább előtérbe kerülnek a talajtömörödés folyamata alatt végbemenő fizikai folyamatokra irányuló vizsgálatok. A talajstabilitás jellemzésére gyakran alkalmazzák az előterhelés, valamint a nyírási ellenállás értékeit (kohézió és belső súrlódási szög), melyeket aztán a behatoló nyomással (pl. a mezőgazdasági gépek deformáló hatásával) hasonlítanak össze (HORN et al., 1995). Emellett figyelembe veszik a pórusvíznyomás változását a terhelés nagysága és hatóideje függvényében, mivel a pórusvíznyomás a terhelés hatására megváltozik, és ezáltal befolyásolja a talaj stabilitását (LARSON & GUPTA, 1980).

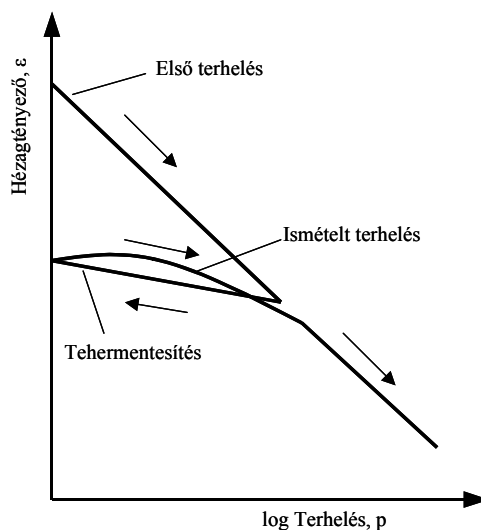
HARTGE és HORN (1992) a talajok 24 órás terhelését javasolták az előterhelés meghatározásához a terhelés hatására bekövetkezett pórusvíznyomás-változás és a

végző összenyomódás figyelembe vétele érdekében. Ezt a terhelési időt – nagy időigénye miatt – gyakran vitatják, annak ellenére, hogy nagyon kevés tanulmány foglalkozott a terhelés hatására bekövetkezett, a pórustér-változás miatt kialakult hidraulikus feszültségváltozás jelentőségével. Mindazonáltal a talajban bekövetkező hidraulikus feszültségváltozás detektálása lehetővé teszi a pórustér változásának jellemzését, amit használhatunk a talaj stabilitásának meghatározásához. Már BOX és TAYLOR (1962) is megfigyelték, hogy a térfogattömeg növekedésével a hidraulikus feszültség megnő.

Tanulmányunkban ismertetjük a különböző időtartamú terhelések hatását a talaj hidraulikus feszültségére, mint stabilizáló tényezőre, valamint a talaj szerkezetváltozására. A következőkben bemutatjuk hogyan reagál a hidraulikus feszültség – mint stabilizáló tényező a talajban – a különböző idejű terhelésekre és ez hogyan befolyásolja a talaj szerkezetváltozását.

Talajtömörödés, előterhelés

A talajt érő fizikai terhelés a feszültségek növekedéséhez vezet a talajban (HARTGE & HORN, 1999). Amíg a talaj belső feszültségei nagyobbak, mint a kívülről ható nyomások, addig a talaj stabil marad. Ha azonban a nyomás meghaladja a talaj kritikus terhelhetőségi szintjét, vagyis a korábban már bekövetkezett maximális terhelési szintet túllépi, akkor irreverzibilis talajdeformáció lép fel. A talajdeformáció mértéke függ a talajra gyakorolt nyomás nagyságától és a hatás időtartamától,



1. ábra

Összenyomódási görbe lefutása az első- és az ismételt terhelési ággal

valamint a szilárd fázis sűrűlódásától, a kohéziós és adhéziós erőktől és a nedvességtartalomtól. Az összenyomási görbe alapján számszerűsíthető a maximális terhelés mértéke, amit az adott talaj még tolerálni képes (1. ábra).

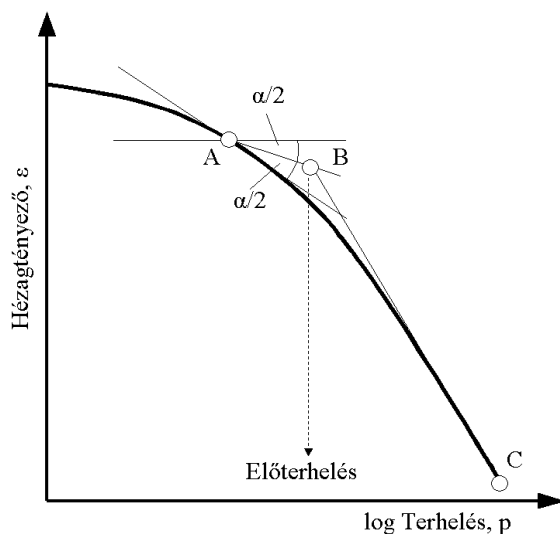
A talaj terhelésekor csökken a pórustér, nő a térfogattömeg és – amennyiben a kívülről ható nyomást nem teljes mértékben a szilárd szemcsék kompenzálják – pórusvíznyomás lép fel. Ezen folyamat során kipréselődik a bezárt levegő és a talajszemcsék egymáshoz közelebb kerülnek. Ezt a folyamatot az első terhelési ág írja le, amely szemi-logaritmikus ábrázolás esetében egyenesként fut le. A tehermentesítés után a talaj azonban nagyrészt plasztikus marad. A túlterhelés/túlkonzolidálás és az első terhelés közötti átmenet jelenti az előterhelést (HARTGE & HORN, 1999). Az előterhelés a talaj szerkezeti fejlődéssel – mint például a zsugorodás és a tágulás, a fagyás és az olvadás, a biológiai aggregáltság, a szemcsék oldalirányú nyomása és a szemcsék összetapadása – növekszik a talaj szilárdsága és mechanikai stabilitása. Ugyanilyen alapon hatnak a kívülről ható erők is, amelyek az első terhelési ágban végbemenő maradandó alakváltozás, valamint a talajtömörödés miatt a talaj stabilitásának növekedéséhez vezetnek. Az első terhelési ágon feltüntetett terheléseknél a talaj csakugyan stabil marad, azonban az ennél nagyobb terheléseknél további tömörödés lép fel. Túlterhelés esetén a tehermentesítés után a talaj felszínén csekély mértékű, pozitív irányú süllyedés (vagyis a talajfelszín felemelkedése) figyelhető meg, melynek mértéke a talaj elaszticitását jellemzi.

Ha az összenyomódási görbét szemi-logaritmikusan ábrázoljuk (KÉZDI, 1952), akkor az ismételt terhelési ágból (laposabb lefutás) az első terhelési ágba (meredekebb lefutás) történő átmenet adja az előterhelést, ami a korábban hatott mechanikai, hidraulikai, kémiai vagy biológiai terhelés maximális értékét mutatja (HARTGE & HORN, 1999). Ez az érték a talaj mechanikai stabilitásának mértéke. Az előterhelési érték meghatározására több grafikus módszer is létezik (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1995), amelyek alkalmazása az előterhelés felhasználási céljától függ. CASAGRANDE (1936) világszerte elismert és alkalmazott grafikus módszerét szemléltetjük a 2. ábrán. Az összenyomódási görbe legkisebb görbületi sugarát az „A” pont jelöli (2. ábra). Ezen a ponton keresztül az x tengellyel egy párhuzamost húzva, valamint a görbe érintőjét megjelölve, adódik az α szög. Ezt a két egyenes közötti szöget felezzük. Az első terhelési görbe alsó részét hátulról (visszamenőleg) extrapoláljuk (BC-egyenes). A két egyenes AB és BC metszéspontja adja az előterhelést.

Mivel az átmenet a két részág között (a legkisebb görbületi sugár pontja) nem mindig egyértelműen ismerhető fel, a legkisebb görbületi sugár meghatározásához VAN GENUCHTEN (1980) modellje is alkalmazható és egy matematikai levezetés segítségével (BAUMGARTL, 2002) az előterhelés kiszámítható

$$e = e_r + \frac{e_s - e_r}{[1 + (\alpha\sigma)^n]^m} \quad (1)$$

ahol: e az aktuális hézagtényezőt jelenti, e_s és e_r a kezdeti és a végső hézagtényezőt jelöli, σ a normálfeszültséget, n , m és α pedig a deformálódás mértékét írja le.



2. ábra

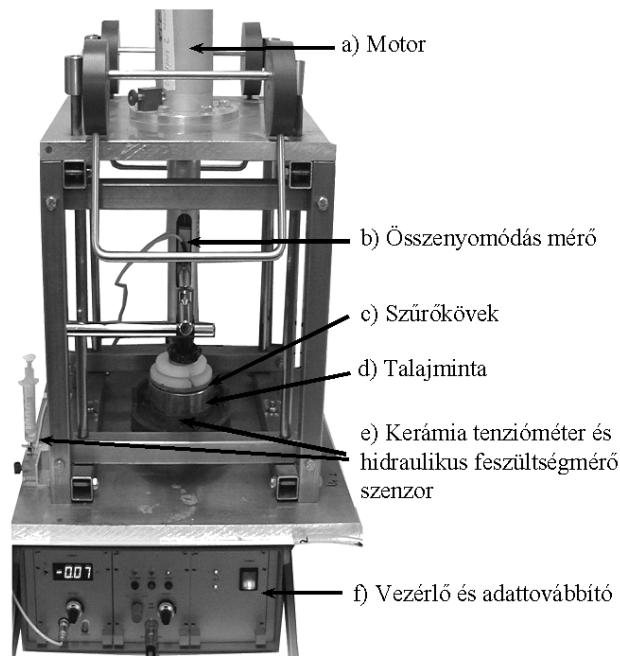
Az előterhelés meghatározása CASAGRANDE (1936) módszerével

Anyag és módszer

A vizsgálatot bolygatott talajmintán végeztük. Az agyagos vályogot légszárazon 2 mm-es szitán át szitáltuk. Ezt a homogenizált talajt 25 súly%-nál és $1,4 \text{ g/cm}^3$ terfogattömegnél mintavevő hengerbe ($d = 10 \text{ cm}$, $h = 3 \text{ cm}$) standardizált eljárással töltöttük. Így a következő pórusnagyságok adódtak: 5,4 térf.% légkapacitás, 31,4 térf.% hasznos vízkapacitás és 13,6 térf.% holtvíztartalom. A nyomás és az idő hatására történő talaj-összenyomódás viselkedésének meghatározásához egy módosított Ödométert (KÉZDI, 1952) gátolt oldalirányú kitágulással, egy ún. Multistep-nyomókészüléket használtunk. A 3. ábra a készülék felépítését mutatja be. A készülék felépítése és a mérőprogram a mérőszensorokkal való kombinációban az egyetem saját kivitelezése. A mechanikai rész egy stabil fémszerkezetből áll, amelyre egy elektromos motort helyeztek és az összenyomódás-mérőt függőlegesen a motorhoz erősítették. A mintavevő hengerben levő talajminta a tányéron kerül elhelyezésre, melynek közepén kerámia tenzióméter helyezkedik el, az éppen aktuális pórusvíznyomás mérésére.

A készülék előnye, hogy az alkalmazott terhelési szintek egy talajmintát terhelnek, és így a talajminták heterogenitása messzemenőleg kizárható. Így egy talajmintából nyerjük az összenyomódási görbe pontjait.

A mérés során a többlépcsős motor fokozatosan viszi fel a talajmintára a terhelést a terhelési idő függvényében. A kiválasztott terhelési szintek a következők voltak: 20, 40, 60, 80, 100, 150, 250 és 400 kPa. A talajmintákat terhelési szintenként 4 különböző terhelési idővel terheltek: 10, 60, 120 és 240 perc/terhelési szint.



3. ábra

A multistep-nyomókészülék felépítése

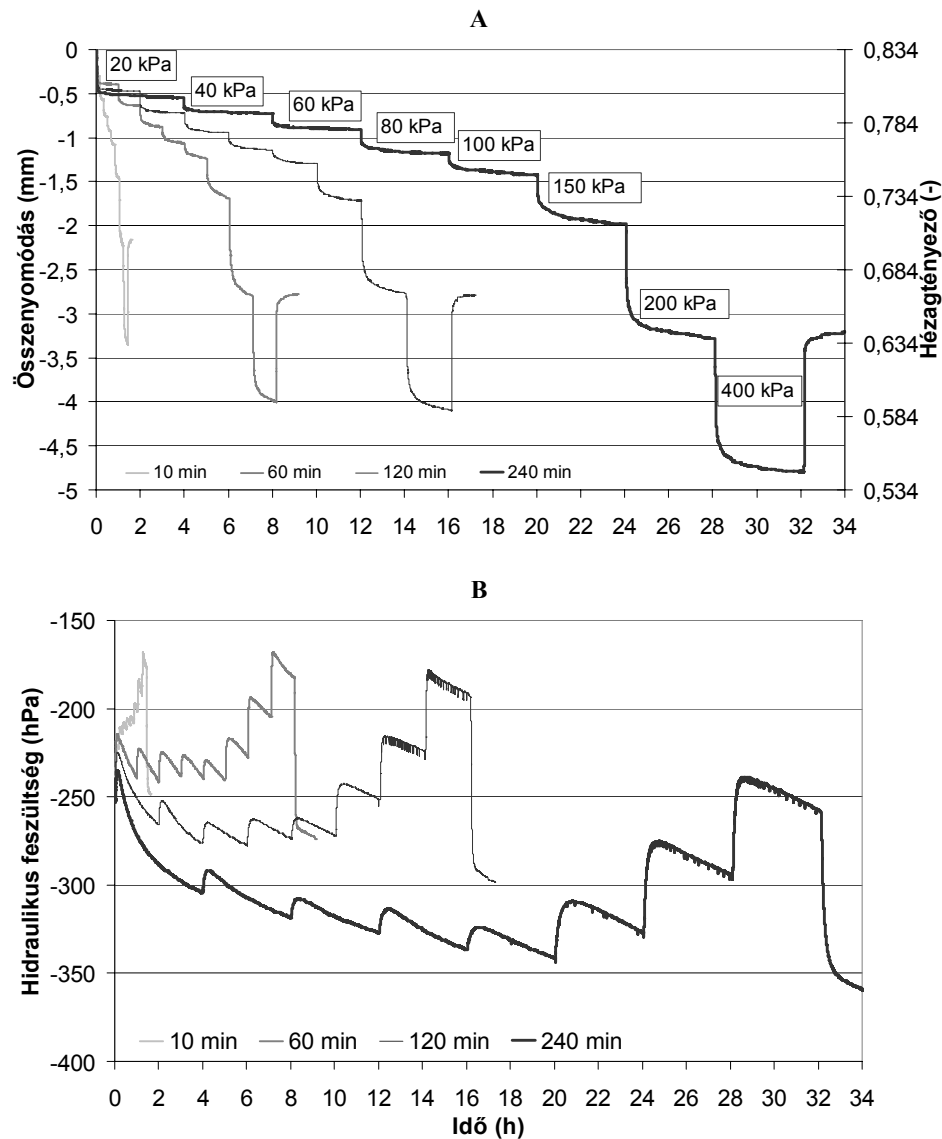
A terhelés alatt az összenyomódás-mérővel a talajdeformációt (mint süllyedést) (4A. ábra) és egy kerámia tenzióméterrel a hidraulikus feszültséget (4B. ábra) is mértük a talajmintában. A forma- és a hidraulikus feszültségváltozást 1/100 mm, ill. hPa pontossággal regisztráltuk.

Eredmények

Terhelésnél csökken a talajminta magassága és ezzel növekszik a térfogattömege. Minden egyes terhelés következtében kezdetben egy meredek süllyedés lép fel, ami idővel ugyanazon terhelési szintnél laposabbá válik (4A. ábra). Ugyanez a jelenség figyelhető meg a teljes összenyomódási görbén is.

A különböző terhelési időknél különböző összenyomódási lefolyása van (4A. ábra). Minél hosszabb ideig terheljük a talajt, annál nagyobb deformáció lép fel a talajban. A pórustér csökkenését a szilárd részre vonatkoztatva (= hézagtenyező) határozzuk meg. Ha a talajszemcsék összenyomódnak, növekszik az érintkezési pontok száma és a hézagtenyező lecsökken.

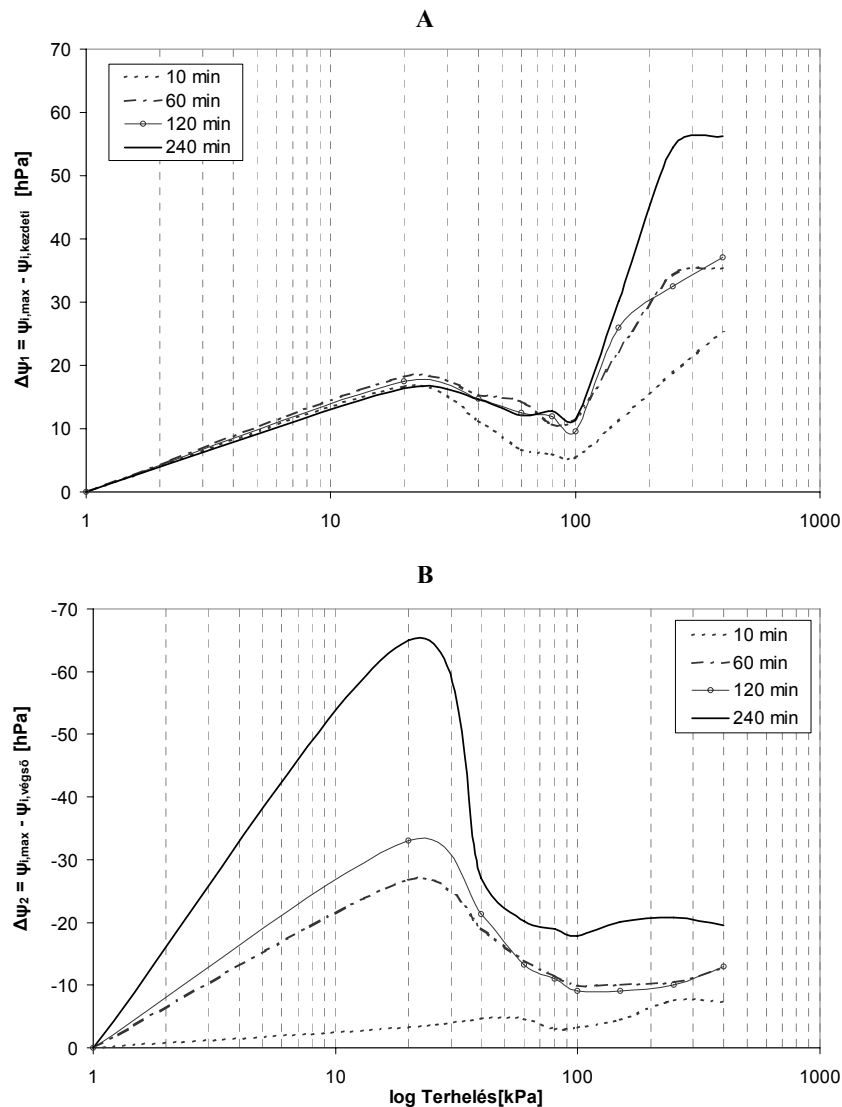
Terhelés során a hézagtenyező csökkenésénél a pórusokban levő víz mobilizálhatóvá válik, mivel a vízmeniszkuszok formái változnak és a vízvezető képesség



4. ábra

Süllyedés (A) és hidraulikus feszültség (B) lefutása az összenyomási kísérletben az egyes terhelési szinteknél különböző terhelési idővel

függvényében egy vízmozgás is fellép, ami a különböző terhelési időknél különbözőképpen alakul (4B. ábra). Ha a pórusvíz nem tud olyan gyorsan mobilizálódni, mint ahogyan a terhelést a talajra adjuk, és amit a talajszerkezet megenged, úgy a pórusvíz veszi fel a teher egy részét. Ennek következtében nő a pórusvíznyomás és az effektív feszültségek a talajban csökkennek. A terhelés elején megnövekszik a



5. ábra

Hidraulikus feszültség különbség ($\Delta\Psi$) változása az idő függvényében egy terhelési szintnél közvetlenül a terhelés felvitele után (t_{init}) (A) és a terhelési idő végén (B)

pórusvíznyomás és a hidraulikus feszültség kevésbé lesz negatív (pozitív irányba halad).

Ha egy terhelés alatt a pórusvíznyomás az idővel lecsökken, a terhet egyre inkább a szilárd fázis veszi fel. A pórusvíznyomás egyensúlyának visszaállása gyorsan megtörténik alacsony terhelési szintnél, míg magasabb terhelési értéknél a kez-

deti állapotot nem éri el, mivel a vízvezető képesség az elszállítandó vízmennyiség-hez képest túl alacsony. A pórusokban uralkodó maximális és a kezdeti hidraulikus feszültség közötti feszültségkülönbség a következő egyenlettel számítható ki:

$$\Delta\psi_1 = \psi_{i,\max} - \psi_{i,\text{kezd}} \quad (2)$$

ahol: $\Delta\psi_1$ jelenti a maximális ($\psi_{i,\max}$) és a kezdeti ($\psi_{i,\text{kezd}}$) hidraulikus feszültségek közötti különbséget.

Az 5A. ábra mutatja, hogy a $\Delta\psi_1$ alacsony terheléseknél nem mutat szignifikáns különbséget a különböző terhelési idők között. Nagyobb terhelésnél a $\Delta\psi_1$ eltérő lefutást mutat a különböző terhelési idők esetén. Minél tovább tart egy terhelés, annál nagyobb lehet a $\Delta\psi_1$ értéke. Rövidebb terhelési időnél ez a különbség a maximális és a kezdeti hidraulikus feszültség között kisebb, mint hosszabb terhelési időnél, mert a pórusvíznyomás egy rövidebb időintervallumon belül nem tudott teljes mértékben kialakulni. Rövid idejű terheléseknél így a következő terhelési szint mindig az éppen kialakult pórusvíznyomáshoz adódik hozzá, ami által a pórusvíznyomások összeadódnak.

Az 5B. ábra mutatja a számolt különbséget a maximális és a végső hidraulikus feszültség között egy terhelési szint hatására, amit a következő képlettel kapunk meg:

$$\Delta\psi_2 = \psi_{i,\max} - \psi_{i,\text{végső}} \quad (3)$$

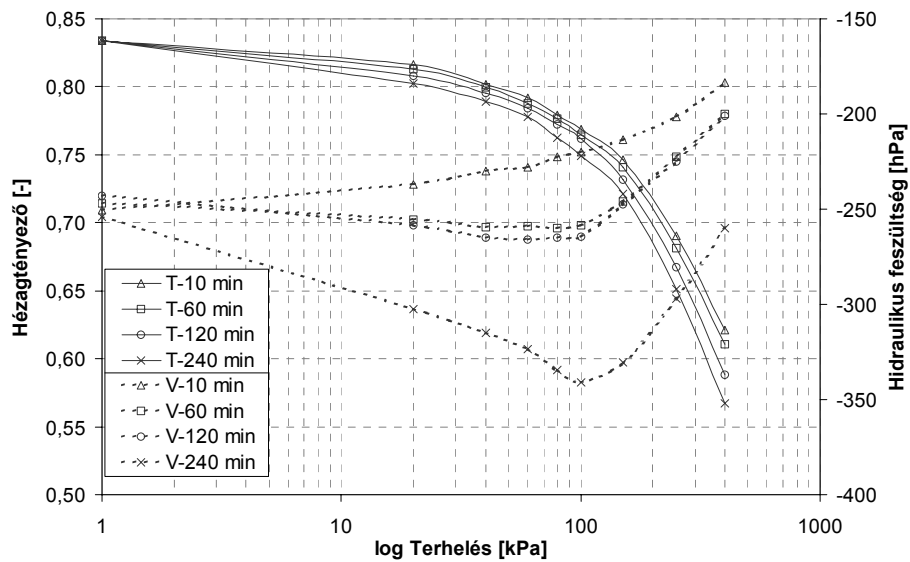
ahol: $\Delta\psi_2$ jelenti a maximális ($\psi_{i,\max}$) és a végső ($\psi_{i,\text{végső}}$) hidraulikus feszültségek közötti különbséget.

A görbék lefutása itt jobban mutatja a különböző terhelési idők közötti különbséget, mint az $\Delta\psi_1$ -nél. A $\Delta\psi_2$ esetében rövid idejű terhelésnél (10 perc/terhelési szint) elhanyagolhatóan kicsi különbség van a maximális és a végső hidraulikus feszültség között (5B. ábra).

Jelentős különbséget figyelhetünk meg a maximális és a végső hidraulikus feszültség ($\Delta\psi_2$) között hosszabb terhelési időnél, mert a kialakult pórusvíznyomás lecsökkent mielőtt a következő terhelés a talajra került volna. A hidraulikus feszültség megközelítette a kiindulási értéket a következő terhelési fokig és ezzel a pórusvíz ismét stabilizálóként hatott.

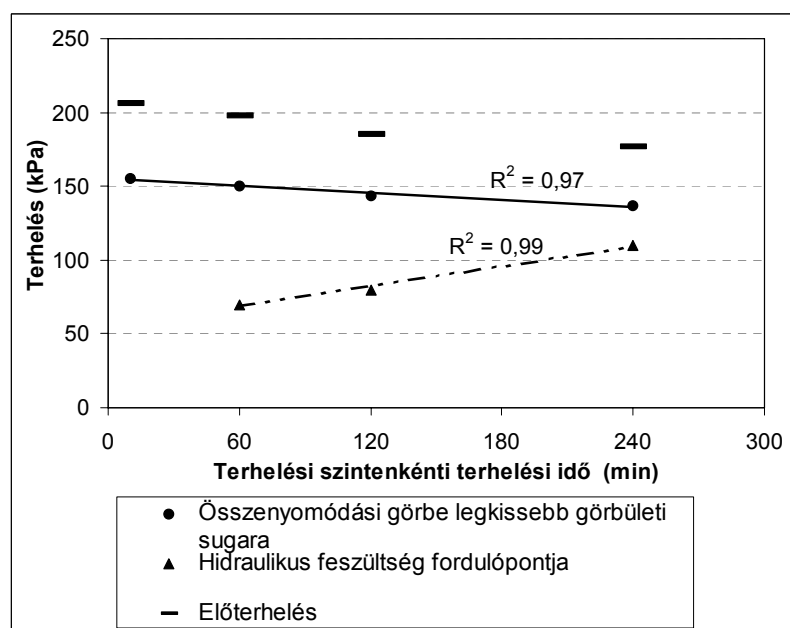
A 4A. és 4B. ábrából leolvasott hidraulikus feszültség és a hézagtenyező értékeit egy terhelési szint végén a 6. ábrán tüntettük fel, a talajban bekövetkezett szerkezetváltozás jobb nyomon követése végett. Rövid idejű terhelésnél (10 perc/terhelési szint) folyamatosan emelkedik a pórusvíznyomás és a növekvő terhelés hatására nő a telítettségi fok is.

Hosszabb idejű terheléseknél (60, 120 és 240 perc/terhelési szint) az idő- és a terhelés növekedésével csökken a hidraulikus feszültség (6. ábra). Növekvő terhelésnél leszűkülnek a pórusok és egyidejűleg csökken a vízvezető képesség is. Nagyobb terheléseknél a pórusok egyre inkább vízzel telítődnek és pórusvíznyomás alakul ki. A hidraulikus feszültség görbéi mutatják, hogy a talajok pórusnagyság, térfogattömeg és telítettségi fok szerint az összenyomódási görbén az ismételt terhelési ágnál konstans vagy negatívabb és az első terhelési ágnál kevésbé negatív hidraulikus feszültségek alakulnak ki. A hidraulikus feszültséget ábrázoló görbe fordú-



6. ábra

Az előterhelés meghatározásához szükséges hézagtényező és az előterhelés értékére utaló hidraulikus feszültség



7. ábra

Összefüggés az előterhelés, az összenyomódási görbe legkisebb görbületi sugara és a hidraulikus feszültségi görbe fordulópontjai között

lasi pontja a két ág között hosszabb terhelési időnél egyértelműen felismerhető, míg rövid idejű terhelésnél (10 perc/terhelési fok) ez nem mutatkozik (6. ábra).

Ha kiszámítjuk az összenyomódási görbéből a legkisebb görbületi sugarat és ebből az előterhelés értékét (7. ábra), úgy különböző értékek adódnak a különböző terhelési időknél. A legkisebb görbületi sugárhoz hasonlóan az előterhelés is csökken a terhelési idő növelésével.

A 6. ábrából a hidraulikus feszültséggörbére történő polinom illesztésével meghatározható a görbe fordulópontja. Ennek eredményeit mutatjuk be a 7. ábrán. A hidraulikus feszültséggörbék fordulópontjai a terhelési idő növelésével közelednek az összenyomódási görbéből kiszámított legkisebb görbületi sugárhoz. A hidraulikus feszültséggörbe fordulópontja és az összenyomódási görbe legkisebb görbületi sugara lineáris kapcsolatban állnak a terhelési idővel, amely egyenesek egymást a „t” terhelési időben metszik. A terhelési időtől függő hidraulikus feszültségváltozások (4., 5., 6. és 7. ábra) mutatják, hogy a pórusokban a feszültségváltozás már korábban bekövetkezett, mint ahogyan ez az összenyomódási görbéből kiolvasható.

A hidraulikus feszültséggörbe fordulópontja és az összenyomódási görbe legkisebb görbületi sugara közötti terhelési tartomány jelöli a kritikus területet, amelynél a pórusok változása és az ezzel együtt járó szerkezetváltozás, illetve stabilitáscsökkenés található. Ez a kritikus tartomány a Casagrande által számolt előterhelési érték előtt helyezkedik el.

Az eredmények megvitatása

A víz a pórustérben befolyásolja a talaj stabilitását, mert ez a terhelés hatására előidézett nyomásváltozásra reagálni tud. A nyomásváltozásra történő reakció azonban csak korlátozottan található meg, mert a víz a megmaradt pórustérben (amely a szemcséktől, aggregátumoktól és a térfogatsúlytól függ), a talajszemcsék között fordul elő. Terheletlen állapotban a meniszkuszok a szemcsék között konkáv görbületűek és összehúzó erőként hatnak (HARTGE & HORN, 1999), következésképpen stabilizálják a talajt. Terhelés következtében azonban a talajszemcsék egymáshoz tolódnak és ezáltal a pórustér leszűkül. Kezdetben a levegő préselődik ki a pórusokból és csak ezután mobilizálódik a pórusvíz. Ha az eredendően levegővel kitöltött pórusok leszűkülnek és ezzel tulajdonképpen az uralkodó hidraulikai feszültségnél még pórusvíz található bennük, akkor az aktuális pórusvíznyomás negatívabb lesz és ezzel a talaj még stabilabb. Ezzel ellentétben, ha azonban a fennmaradó pórustér közel vízzel telített, akkor a vízmeniszkuszok egy laposabb formát vesznek fel egészen addig, amíg a víz a pórusokból ki nem folyik, így akár pozitív pórusvíznyomások (= konvexhez irányuló meniszkuszforma) is fellépnek (DRESCHER et al., 2002). A pórusvíz elveszíti stabilizáló hatását. A feszültség ebben az állapotban a talajszemcsékről a pórusvízre adódik át és különböző normálfeszültségek uralkodnak az egész mátrixban a szemcse és a víz érintkezési felületénél. A TERZAGHI (cit. In: BISHOP, 1961) által leírt összes feszültség (σ') a talajban a tényleges feszültségből (σ) és a semleges feszültségből (u) tevődik össze:

$$\sigma' = \sigma + (-u)$$

Telítetlen talajnál figyelembe veszik még a légfázist is, amelyet χ -faktor jelöl (BISHOP, 1961), ami a pórusvíz területi részét írja le

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w),$$

ahol: u_a a póruslégnyomást, u_w a pórusvíznyomást jelentik. χ -értéke 0 (pF7-nél) és 1 (vízzel telített állapotban) között van és megmutatja a telítettségi fokot és ezzel a pF-görbe karakterisztikáját (SNYDER & MILLER, 1985). A gyakorlatban azonban a póruslégnyomás befolyását elhanyagolhatónak tekintik.

Ha a terhelési folyamat alatt egy paraméter a feszültségi egyenletből megváltozik, akkor a víz mobilizálhatóvá válik (BAUMGARTL, 1991), amit az itt leírt eredmények is alátámasztanak. A pórusvíz résznek a jelentősége az idővel megnő és ennek befolyása is van a vízvezető képességre. Mivel a talajterhelés során a pórusvíznek időre van szüksége ahhoz, hogy elfolyhasson, ezért az előterhelés értéke a vízvezető képesség miatt időfüggő. Annál a terhelésnél, ahol a pórusvíznyomás nem tud lecsökkenni, ott a talaj képlékennyé válik. A víz összenyomhatatlansága miatt az előterhelés rövidebb terhelési időnél magasabb értéket mutat, mert a pórusvíz a teher egy részét felveszi. Idővel a pórusvíz mozgékonyabbá válik, amit Darcy folyási egyenletével definiálni lehet. A pórusvíz a pórusokból kifolyik és így egy további süllyedési folyamat léphet fel a talajban. A pórusvíznyomás-változás hatására bekövetkezett stabilitáscsökkenés mindaddig megmarad, amíg a pórusokban levő meniszkuszforma az adott terhelési szintnél a kezdeti forma közelébe nem kerül. A pórusvíznek ezen mozgása a talajtulajdonságok mellett (mint pl. szerkezet, szervesanyag-tartalom, nedvességtartalom stb.) időfüggő is. Általában a hidraulikus feszültség a terhelés idejénél és az uralkodó vízvezető képességnél a legtöbbször a „stabilizáló állapotot” nem éri el, mint az a terhelés kezdetén volt.

A hidraulikus feszültségek fordulópontjaira helyezett egyenesek és az összenyomódási görbék legkisebb görbületi sugarára helyezett egyeneseknek van egy elméleti metszéspontjuk (7. ábra). Az elméleti metszéspont a terhelési idővel határozható meg, ahol a hidraulikai és a mechanikai feszültségek a talajban azonos nagyságúaknak tekinthetők. A két egyenes által bezárt terület szolgálhatna a talajszerkezet megváltozásának mértékéül. Ebben az irányban azonban további kutatások szükségesek.

Általánosságban elmondható, hogy hosszabb terhelési idővel a hidraulikus feszültség az előterhelés meghatározásánál – mint a talajstabilitás mértéke – egyre inkább figyelembe kerül. Az előterhelés értéke így minden mechanikai és hidraulikai folyamatot tartalmaz. Egy terhelés következményeként a süllyedési folyamatok visszatükröződnek stabilitási/destabilitási folyamatokként és a pórusvíz mobilitásaként a talajban.

Összefoglalás

Növekvő terhelésnél nő a térfogattömeg és a pórusvíznyomás. Emelkedő terhelési idővel nagyobb süllyedés jön létre és ezáltal egy kisebb előterhelés. Az előter-

helést a hidraulikus feszültségváltozáson keresztül a talajdeformáció befolyásolja, a terhelés és a terhelési idő függvényében.

Egy lezárt süllyedési folyamathoz és ezáltal egy valós előterhelési értékhez addig terheljük a talajt, amíg a terhelés hatására fellépő pórusvíznyomás ismét az adott terhelési szintnél a kezdeti érték közelébe nem kerül. A hidraulikus feszültségváltozásból egy terhelési folyamat (0-tól 400 kPa-ig) alatt lehet a kritikus tartományt meghatározni.

A pórusnagyság, a térfogattömeg és a telítettségi fok függvényében a deformáció során elért kritikus tartományban az előterhelés előtt a talaj kevésbé víztelített, mint az első terhelési ágban. A hidraulikus feszültség nagyságának változása alacsonyabb terhelésnél következik be, mint amit a CASAGRANDE (1936) módszerével kiszámolt előterhelés mutat. A Casagrande-féle előterhelés mellett meg kellene nevezni azt a terhelési értéket is, amelynél a hidraulikus feszültségváltozás található. Az előterhelési értékkel és a hidraulikus feszültségváltozással együtt számszerűsíthető egy terhelés hatására bekövetkezett szerkezet- és pórusfunkció- változás a talajban.

A hidraulikus feszültség fordulópontja és az összenyomódási görbe legkisebb görbületi sugara által meghatározott pontokra illesztett egyenesek közelítenek egymáshoz növekvő terhelési idővel és metszik egymást egy elméleti pontban. Az elméleti metszéspontban a hidraulikai és mechanikai feszültségek a talajban kiegyenlítik egymást. Az egyenesek által lehatárolt terület függ a talaj szerkezetétől.

Jelen kutatás a Konrad Adenauer Alapítvány ösztöndíj-támogatásával folyt.

Kulcsszavak: előterhelés, hidraulikus feszültség, tömörödés, időbeni süllyedés, vízvezető képesség

Irodalom

- BAUMGARTL, T., 1991. Spannungsverteilung in unterschiedlich strukturierten Böden und ihre Bedeutung für die Bodenstabilität. Heft 12. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, CAU. Kiel.
- BAUMGARTL, T., 2002. Prediction of tensile stresses and volume change with hydraulic models. In: Sustainable Land Management – Environmental Protection. A Soil Physical Approach. (Eds.: PAGLIAI, M. & JONES, R.). Advances in Geoecology. **35**. 504–514. Catena Verlag. Reiskirchen.
- BIRKÁS M. (szerk.), 2001. Talajművelés a fenntartható gazdálkodásban. Akaprint. Budapest.
- BISHOP, A. W., 1961. The measurement of pore pressure in the triaxial test. In: Pore Pressure and Suction in Soils. 38–46. Butterworth. London.
- BOX, J. E. & TAYLOR, S. A., 1962. Influence of soil bulk density on matric potential. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. **26**. 119–122.

- CASAGRANDE, A., 1936. The determination of preconsolidation load and its practical significance. In: Proc. 1st International Conference Soil Mech. Found. Eng., Cambridge. **3**. 60–64.
- DIAS JUNIOR, M. S. & PIERCE, F. J., 1995. A simple procedure for estimating re-consolidation pressure from soil compression curve. Soil Technology. **8**. 139–151.
- DRESCHER, J., HORN, R. & DE BOODT, M. (Eds.), 2002. Interaction of Structured Soils with Water and External Forces. Catena Supplement 11. Reiskirchen.
- FARKAS CS., 2004. A művelés és a talajállapot hatása a talaj nedvességforgalmára. In: Talajhasználat – Műveléshatás – Talajnedvesség. (Szerk.: BIRKÁS M. & GYURICZA CS.) 61–81. Szent István Egyetem. Gödöllő.
- FARKAS CS., TÓTH E. & VÁRALLYAY GY., 2004. A talaj fizikai tulajdonságainak vizsgálata talajművelési kísérletben. Agro-21 Füzetek. **37**. 111–122.
- HAKANSSON, I. et al., 1987. Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yields in humid regions with annual freezing. Soil Tillage Res. **11**. 239–282.
- HARTGE, K. H. & HORN, R., 1992. Die physikalische Untersuchung von Böden. Ferdinand Enke-Verlag. Stuttgart
- HARTGE, K. H. & HORN, R., 1999. Einführung in die Bodenphysik. 3. Auflage. Enke-Verlag. Stuttgart.
- HORN, R., VAN DEN AKKER, J. H. & ARVIDSSON, J., 2000. Subsoil Compaction – Distribution, Processes and Consequences. Advances in Geoecology **32**. Catena Verlag. Reiskirchen.
- HORN, R. et al., 1994. Soil physical properties related to soil structure. Soil Till. Res. **30**. 187–216.
- HORN, R. et al., 1995. Effect of aggregate strength on changes in strength and stress distribution in structured bulk soils. In: Soil Structure – Its Development and Function. (Eds.: HARTGE, K. H. & STEWART, R.) Advances in Soil Science. 31–52. Lewis Publ. Boca Raton.
- KÉZDI Á., 1952. Talajmechanika. Tankönyvkiadó. Budapest.
- LARSON, W. E. & GUPTA, S. C., 1980. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. Soil Sci. Soc. Am. J. **44**. 1127–1132.
- SNYDER, V. A. & MILLER, R. D., 1985. Tensile strength of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. **49**. 58–65.
- SOANE, B. D. et al., 1981a. Compaction by agricultural vehicles: A review. I. Soil and wheel characteristics. Soil Tillage Res. **1**. 207–237.
- SOANE, B. D. et al., 1981b. Compaction by agricultural vehicles: A review. II. Compaction under tyres and other running gear. Soil Tillage Res. **2**. 3–36.
- SÖHNE, W., 1951. Das mechanische Verhalten des Ackerbodens bei Belastungen, unter rollenden Rädern sowie bei der Bodenbearbeitung. Grundl. Landtechnik. **9**. 87–94.
- VAN GENUCHTEN, M. TH., 1980. A closed-form equaliation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. **44**. 892–898.
- VOORHEES, W. B., SENST, C. G. & NELSON, W. W., 1978. Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the northern Corn Belt. Soil Sci. Soc. Am. J. **42**. 344–349.

Érkezett: 2005. április 9.

Interaction between Mechanical and Hydraulic Aspects of Soil Strength as a Function of the Compression Time

O. FAZEKAS and R. HORN

Christian-Albrechts University, Kiel (Germany)

Summary

Over the last ten years many studies have been made on soil deformation caused by agricultural machinery and its consequences on plant growth as well as on ecological properties. However, very often only the direct effects of mechanical stress on changes in void ratio or pore functions are analyzed, while the interaction between hydraulic and mechanical processes are seldomly mentioned. An analysis was thus made on the effect of mechanical stress and time of soil settlement on changes in void ratio and the corresponding effects on changes in pore water pressure for a clayey silt. Each disturbed sample with a bulk density of 1.4 g/cm^3 and a water content of 0.25 g/g was compressed for 4 different lengths of time (10–240 mins.) with 8 stress levels (20 – 400 kPa). With increasing stress application time a more intense decline in void ratio and a smaller precompression stress value was determined. Parallel to these variations in settlement we also found changes in the pore water pressure values which either became more negative (mostly at small stresses) or less negative (at higher stresses). At constant stress application the changes in pore water pressure values declined again especially with increasing loading times and at smaller stress values. After exceeding a certain threshold value the pore water pressure values became less negative and added up with increasing stress. The differences between the precompression stress value derived from the stress strain curves and the deflection point of the pore water pressure/stress relation reveal a theoretical measure for structure stability, but this will require further investigation.

Fig. 1. Stress strain curve subdivided into recompression and virgin compression curves. Horizontal axis: log compression. Vertical axis: Void ratio.

Fig. 2. Determination of the precompression stress value according to Casagrande. a) Precompression. Horizontal and vertical axes: see Fig. 1.

Fig. 3. Multistep compression test device. A) Motor; b) settlement sensor; c) filter gravel; d) soil sample; e) ceramic tensiometer and pore water pressure sensor; f) control module and data transmitter.

Fig. 4. Stress-dependent settlement (A) and changes in pore water pressure (B) in the compression experiment for various compression levels and times. Horizontal axis: Time (hours). Vertical axis: Settlement, mm (A); Pore water pressure, hPa (B).

Fig. 5. Changes in stress-dependent pore water pressure values ($\Delta\Psi$) as a function of time at the beginning of settlement, at time t_{init} (A) and at the end of settlement (B).

Fig. 6. Pore water pressure and void ratio/stress patterns as the basis for the determination of precompression stress.

Fig. 7. Changes in the precompression stress values and the deflection point of the pore water pressure/stress relation as a function of compression time.